

DOI: 10.12264/JFSC2020-0318

不同海拔稻鲤综合种养梯田大型底栖动物群落结构特征

许越^{1,2}, 房景辉^{2,4}, 徐钢春³, 蒋增杰^{2,4}, 聂志娟³, 梁博^{1,2}, 蔺凡^{2,4}

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214128;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 2019 年 5—8 月在云南省红河县哈尼梯田研究了不同海拔(570 m 和 1840 m)稻鲤综合种养梯田中大型底栖动物的群落结构。结果表明: (1)低海拔梯田内共发现大型底栖动物 25 种, 隶属 3 门 3 纲, 其中寡毛纲(Oligochaeta) 9 种, 昆虫纲(Insecta)16 种, 腹足纲(Gastropoda)1 种; 高海拔梯田内共发现大型底栖动物 24 种, 隶属 2 门 2 纲, 其中寡毛纲 3 种, 昆虫纲 21 种。寡毛纲和昆虫纲是高、低海拔梯田的主要大型底栖动物类群, 且种类组成差异显著($P<0.05$)。高、低海拔梯田均发现了摇蚊属(*Chironomus*)和长跗摇蚊属(*Tanytarsus*)水稻害虫, 此外, 在低海拔梯田还发现了水稻害虫福寿螺(*Pomacea canaliculata*)。 (2) 4 个月份 Jorgensen 指数值和 Jaccard 相似性指数值均说明不同海拔梯田中大型底栖动物群落结构存在较大差异。 (3) 6 月和 7 月, 高、低海拔之间 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数在同一月份差异显著($P<0.05$), 其余月份差异不显著($P>0.05$)。 (4) 双因素方差分析表明, 月份和海拔对不同海拔梯田中的大型底栖动物密度影响显著($P<0.05$), 月份对生物量影响显著($P<0.05$), 而海拔对其影响不显著($P>0.05$), 月份和海拔间均存在交互作用($P<0.05$)。研究表明, 月份和海拔是影响不同海拔哈尼梯田稻渔综合种养系统大型底栖动物群落结构的主要因素, 同时, 鲤的摄食压力也是导致大型底栖动物群落结构变化的重要因素, 鲤可以有效降低梯田中水稻害虫的生物量。

关键词: 鲤; 稻渔综合种养; 大型底栖动物; 群落结构; 哈尼梯田; 海拔

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)05-0624-11

哈尼梯田分布于中国云南省哀牢山南段红河南岸, 位于海拔 144~2000 m、坡度 15°~75°的山坡上^[1], 其景象壮观秀美, 于 2013 年被列入世界遗产名录^[2]。然而, 哈尼梯田耕作劳动强度大、收入低, 导致很多梯田逐渐荒废、损坏, 因此, 哈尼梯田保护迫在眉睫。近年来, 我国稻渔综合种养技术发展迅速, 其将种植业与渔业结合起来, 实现“一水两用、一地双收”, 不但能够获得健康农产品和丰富的水产品来提高经济效益, 而且具有显著的社会效益和生态效益^[3]。据农业农村部渔

业渔政管理局 2018 年统计, 云南省稻渔种养面积全国排名第 7 位^[4], 具有实施梯田稻渔综合种养的产业基础, 同时, 稻渔种养可以大大提高哈尼地区人民种地积极性, 对哈尼梯田的保护具有促进作用。目前, 哈尼梯田稻渔综合种养系统的生态特征尚不清楚, 不利于科学合理地开展梯田稻渔综合种养生产。

稻渔综合种养生态系统是典型的人工湿地生态系统, 大型底栖动物是稻渔综合种养生态系统中的一个重要生物类群, 在生态系统中起到承上

收稿日期: 2020-09-17; 修订日期: 2020-12-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900302); 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-25); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2019HY-YJ0202, 2020ZX0204); 中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费项目(20603022019016).

作者简介: 许越(1996-), 男, 研究生, 研究方向为养殖生态学. E-mail: 1037971757@qq.com

通信作者: 房景辉(1983-), 男, 副研究员, 研究方向为养殖生态学. E-mail: hui861@163.com

启下的作用。其在食物网中扮演着消费者和转移者的角色,在物质循环和能量流动中起着重要作用^[5],其生物量占总底栖动物总生物量的比例大多在90%以上^[6]。底栖动物种类丰富,因其具有相对长的生活史和较稳定的生存场所,对一些化学和物理变化有较强的耐受能力,能够反映生态系统的长期变化特征^[7-8]。大型底栖动物不但可以作为水质评价的指示生物,其代表的次级生产力的大小也影响着渔业生产^[9]。大型底栖动物群落结构状况可以间接反映稻渔综合种养系统的健康状态,因此,对哈尼梯田稻渔综合种养系统中大型底栖动物群落的研究有助于查明该系统的生态特征。哈尼梯田海拔高度差近2000 m,高、低海拔环境特征差别很大,开展稻渔综合种养需要区别对待。本研究针对不同海拔哈尼梯田稻渔综合种养系统中大型底栖动物群落组成、密度、生物量和多样性等方面的差异开展研究,为哈尼梯田稻渔综合种养系统生态特征研究和优化不同海拔哈尼梯田稻渔综合种养技术方案提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验水稻选取的是具有优质、高产量、抗病性强的‘红阳2号红米’;实验用鱼是由中国水产科学研究院淡水渔业研究中心提供的新品种——‘福瑞鲤2号’(Cyprinus carpio L, 品种登记号为GS-01-003-2017。);实验地点在云南省哈尼族彝族自治州红河县,选取低海拔(570 m, 坐标23°17′54″ N, 102°23′58″ E)和高海拔(1840 m, 坐标23°17′23″ N, 103°18′40″ E)两处梯田作为实验场地。

1.2 实验设计与管理

3月28—29日,高、低海拔各选择3块水源充足、水质良好、土质保水力强、注排水方便、不受干旱和洪水影响的梯田,每块梯田面积在0.5 hm²以上,加高田埂至0.5 m,加宽田埂至0.4 m。在每块田中央挖一个宽0.5 m、深0.4 m的排水口,并放置梯田生物防逃网。高海拔梯田编号H₁、H₂、H₃,低海拔编号L₁、L₂、L₃。

4月10—11日,高、低海拔梯田进行犁地松

土,按照1000~1500 kg/hm²施放腐熟农家肥,将梯田水位加至30 cm左右泡田。

4月28—29日,选择高产、优质、抗病的红阳2号红米水稻秧苗在低海拔3块梯田内进行插秧,按照2.5万丛/hm²,每丛2苗插秧。5月15—16日,选取水稻秧苗在高海拔3块梯田进行插秧,插秧密度与低海拔相同。

福瑞鲤在云南红河中海渔业有限公司基地繁育,筛选体质健壮、无病无伤、规格整齐[平均体长12~15 cm, 平均体重(38.46±5.46) g]的鱼苗,放鱼前停止投喂24 h。5月28日,将鱼苗用3%~5%食盐水浸泡5~10 min,然后装入鱼袋中充氧密封,做好编号,按照250尾/hm²的密度对应编号将鱼苗放入梯田中。放鱼后,安排专人对实验田进行管理,包括维护田埂,科学管水等。

1.3 样品采集与测定

2019年5月28日放鱼,按月份采样4次,时间分别为2019年的5月28—29日、6月28—29日、7月28—29日、8月28—29日,实验持续时间为4个月。

采样时,先采集低海拔梯田样品,再采集高海拔梯田样品。每块梯田随机选取3处未被人为干扰过的地方采样,使用兵工铲划出一个约8 cm×8 cm的方形采样区域,采集表层约2 cm厚的底泥,测量所采底泥的长和宽并记录。样品经网目450 μm筛绢过滤冲洗后,剩余部分置于白色搪瓷解剖盘中,用镊子将大型底栖动物逐一挑出,快速放置在70%乙醇中固定。大型底栖动物样品由中国科学院水生生物研究所专业人员分析鉴定。

1.4 数据计算与分析

采用Jargensen指数, Jaccard相似性指数比较高、低海拔各月份大型底栖动物群落结构相似性;采用Shannon-Wiener、Pielou、Margalef指数评估生物多样性。采用独立样本T检验来检测寡毛纲和昆虫纲分别在高、低海拔各个月份物种组成之间的差异显著性。采用双因素方差(two-way ANOVA)分析高、低海拔和月份之间的大型底栖动物群落Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Margalef指数、密度及生物量之间的差异显著性。

根据已有研究获得以下参数的计算方法:

(1) Shannon-Wiener 多样性指数^[10]

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

式中, S 为群落中物种数目; N 为样方中观察到的个体总数(ind/m²); n_i 为第 i 种物种的个数(ind/m²)

(2) Pielou 均匀度指数^[11]

$$J = \frac{H'}{H_{\max}} = \frac{H'}{\ln S}$$

(3) Margalef 丰富度指数^[12]

$$d_M = (S - 1) / \ln N$$

(4) 优势度 $Y^{[13-14]}$

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

式中, n_i 为第 i 种的个数; N 为该样方总个数; f_i 为第 i 种在各采样点位出现的频率。当 $Y>0.02$ 时, 该物种为优势种。

(5) Jorgensen 指数和 Jaccard 相似性指数^[15]

$$S=2c/(a+b)$$

$$S_j=c/(a+b-c)$$

式中, S 为 Jorgensen 指数; S_j 为 Jaccard 相似性指数; c 为两个海拔群落共有的物种数; a 为低海拔大型底栖动物群落中的物种数; b 为高海拔大型底栖动物群落中的物种数。

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落组成

低海拔梯田内共发现大型底栖动物 25 种, 隶属 3 门 3 纲, 其中寡毛纲 9 种, 昆虫纲 15 种, 腹足纲 1 种; 高海拔梯田内共发现大型底栖动物 24 种, 其中寡毛纲 3 种, 昆虫纲 21 种(表 1)。高、低海拔的主要类群寡毛纲和昆虫的种类组成差异显著($P<0.05$)。低海拔的特有物种是参差仙女虫(*Nais variabilis*)、吻盲虫一种(*Pristina* sp.)、福寿螺(*Pomacea canaliculata*)等。高海拔梯田内发现长跗摇蚊属(*Tanytarsus*)和摇蚊属(*Chironomus*)共计 4 种水稻害虫, 低海拔梯田内发现长跗摇蚊属、摇蚊属和福寿螺共计 6 种水稻害虫。

高海拔梯田 4 个月份大型底栖动物中均以节肢动物物种数量最多, 占比最大; 其次是环节动物(图 1)。其中, 大型底栖动物物种数量在 6 月最

表 1 高、低海拔哈尼梯田内大型底栖动物群落组成
Tab. 1 Composition of macrobenthos communities in high and low altitude terraces

种类 species	高海拔 high altitude	低海拔 low altitude
环节动物门 Annelida		
寡毛纲 Oligochaeta		
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+
巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>	+	—
印西头鳃虫 <i>Branchiodrilus hortensis</i>	—	+
多毛管水蚓 <i>Aulodrilus pluriset</i>	—	+
管水蚓一种 <i>Aulodrilus</i> sp.	—	+
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	—	+
参差仙女虫 <i>Nais variabilis</i>	+	+
多突瓣皮虫 <i>Slavina appendiculata</i>	—	+
吻盲虫一种 <i>Pristina</i> sp.	—	+
节肢动物门 Arthropoda		
昆虫纲 Insecta		
菱跗摇蚊一种 <i>Clinotanypus</i> sp.	+	+
花翅前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>	+	+
隐摇蚊一种 <i>Cryptochironomus</i> sp.	+	+
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	+	+
雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes</i>	+	+
长跗摇蚊 <i>Tanytarsus</i> sp.	+	+
前突摇蚊一种 <i>Procladius</i> sp.	+	+
伸足凯氏摇蚊 <i>Kiefferulus tendipediformis</i>	—	+
多齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus multannulatus</i>	+	—
斯蒂齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus sticticus</i>	+	—
多足摇蚊一种 <i>Polypedilum</i> sp.	+	+
多足摇蚊一种 <i>Rheotanytarsus</i> sp.	+	—
腔摇蚊一种 <i>Coelotanypus</i> sp.	+	—
长足摇蚊亚科一种 <i>Tanypodinae</i> sp.	+	—
摇蚊亚科一种 <i>Chironomus austini</i>	—	+
摇蚊一种 <i>Chironomus</i> sp.	+	+
摇蚊亚科一种 <i>Chironomus staegeri</i>	+	+
摇蚊亚科一种 <i>Chironomus cf longipes</i>	—	+
摇蚊亚科一种 <i>Chironomus ocreatus</i>	+	—
摇蚊亚科一种 <i>Cladotanytarsus</i> sp.	+	—
恩菲摇蚊一种 <i>Einfeldia</i> sp.	—	+
螺科一种 <i>Ceratopogonidae</i> sp.	—	+
春蜓科一种 <i>Gomphidae</i> sp.	+	—
虻科一种 <i>Tabanidae</i> sp.	+	—
四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	+	—
软体动物门 Mollusca		
腹足纲 Gastropoda		
福寿螺 <i>Pomacea canaliculata</i>	—	+

多, 共有 12 种。低海拔梯田 5 月出现物种数量最多, 共有 16 种。其中, 节肢动物和环节动物各有 8 种。

节肢动物门中的摇蚊科种类在高海拔和低海拔梯田中均占底栖动物总数的比例最大, 分别占 84.03%和 53.61%。5 月和 8 月高、低海拔梯田之

间摇蚊科种类密度存在显著差异($P<0.05$), 其他月份差异不显著。高海拔梯田中生物量占比最大的是摇蚊科种类, 占比 52.41%。低海拔梯田中生物量占比最大的是环节动物门的寡毛纲, 占比 57.73%。8 月高低海拔之间生物量存在显著差异($P<0.05$), 其他月份差异不显著($P>0.05$)。

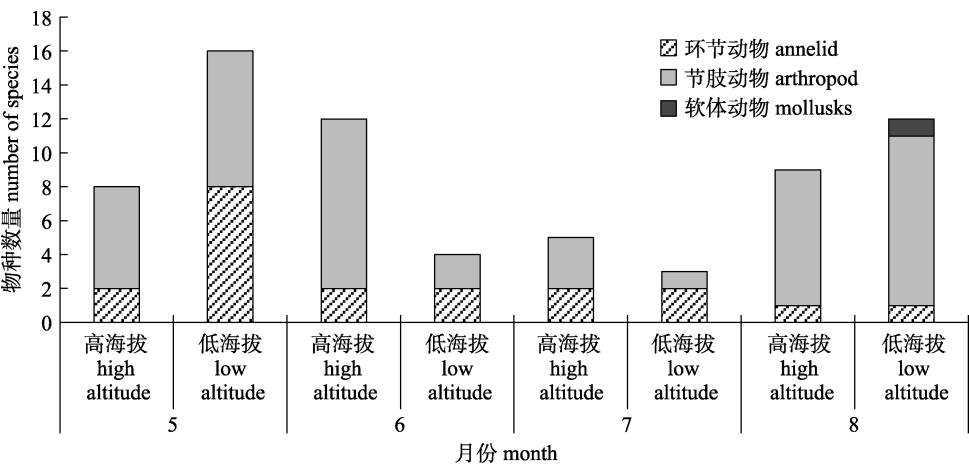


图 1 不同月份高、低海拔梯田内大型底栖动物的物种数量

Fig. 1 Number of macrobenthos species in terraces at high and low altitude in different months

2.2 底栖动物群落相似性

从表 1 可知, 高、低海拔梯田内大型底栖动物群落共有物种为苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、参差仙女虫、菱跗摇蚊(*Clinotarypus* sp.)、花翅前突摇蚊(*Procladius choreus*)、隐摇蚊(*Cryptochironomus*)、羽摇蚊(*Chironomus plumosus*)、雕翅摇蚊(*Glyptotendipes*)、长跗摇蚊(*Tanytarsus* sp.)、前突摇蚊一种(*Procladius* sp.)、多足摇蚊一种(*Polypedilum* sp.)、摇蚊一种(*Chironomus* sp.)、摇蚊亚科一种(*Chironomus staegeri*), 一共 13 种。4 个月份高、低海拔梯田大型底栖动物群落的 Jorgensen 指数和 Jaccard 相似性指数平均值较小, 分别为 0.37 和 0.24 (表 2), 说明两个海拔大型底栖动物群落结构相似性存在较大差异。

2.3 底栖动物群落多样性

高海拔梯田底栖动物群落的 Shannon-Wiener 多样性指数为 1.29 ± 0.08 , 显著高于低海拔梯田的 0.91 ± 0.42 , 并呈现先升高后降低的趋势, 但从 5 月到 8 月间变化不大。而低海拔梯田的 Shannon-Wiener 多样性指数呈现先降低后升高的趋势, 从

5 月到 8 月间变化显著, 6 月和 7 月显著低于 5 月。6 月和 7 月, 高、低海拔之间 Shannon-Wiener 多样性指数在同一月份差异显著($P<0.05$)。5 月和 8 月, 高、低海拔之间该指数在同一月份差异不显著($P>0.05$, 图 2a)。

表 2 不同月份高、低海拔梯田大型底栖动物群落的 Jorgensen 指数和 Jaccard 相似性指数

Tab. 2 Jorgensen index and Jaccard similarity index of macrobenthos communities in terraces at high and low altitude in different months		
月份 month	Jorgensen 指数 Jorgensen index	Jaccard 相似性指数 Jaccard similarity index
5 月 May	0.56	0.39
6 月 June	0.27	0.15
7 月 July	0.22	0.13
8 月 August	0.43	0.28
平均 average	0.37	0.24

高海拔梯田底栖动物群落的 Pielou 均匀度指数为 0.83 ± 0.05 , 低海拔梯田为 0.78 ± 0.13 , Pielou 均匀度指数在高海拔和低海拔之间差异不显著($P>0.05$)。高海拔梯田 4 个月份 Pielou 均匀度指数没有显著差异($P<0.05$)。低海拔均匀度指数除 7

月比高海拔小之外,其余月份均比高海拔要大。6 月和 7 月高低海拔之间 Pielou 均匀度指数差异显著 ($P<0.05$), 5 月和 8 月差异不显著 ($P>0.05$, 图 2b)。

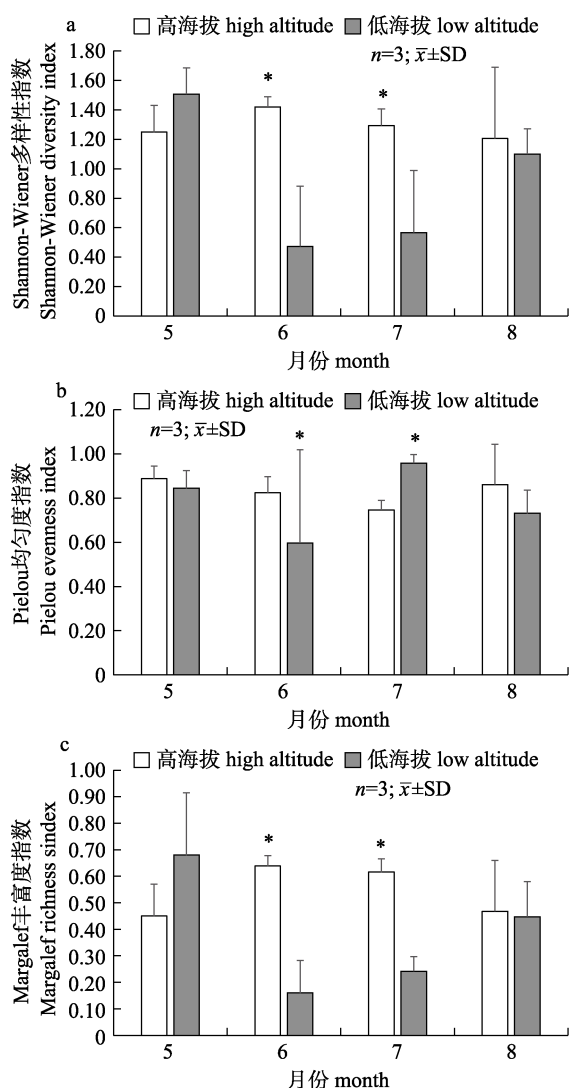


图 2 不同月份高、低海拔梯田大型底栖动物群落的 Shannon-Wiener 多样性指数(a)、

Pielou 均匀度指数(b)和 Margalef 丰富度指数(c)

*表示同一月份的高、低海拔之间差异显著 ($P<0.05$)。

Fig. 2 Shannon-Wiener diversity index (a), Pielou evenness index (b) and Margalef richness index (c) of macrobenthic communities in terraces at high and low altitude in different months

* indicates significant difference between high and low altitude in the same month ($P<0.05$).

高海拔梯田底栖动物群落的 Margalef 丰富度指数为 0.54 ± 0.08 , 显著高于低海拔梯田的 0.38 ± 0.20 , 并呈现出先升高后降低的趋势, 但从 5 月到 8 月间变化不大。而低海拔梯田的 Margalef 丰富度指

数呈现出先降低后升高的趋势, 从 5 月到 8 月间变化显著。6 月和 7 月, 高、低海拔梯田 Margalef 丰富度指数在同一月份差异显著 ($P<0.05$)。5 月和 8 月, 高、低海拔梯田该指数在同一月份差异不显著 ($P>0.05$, 图 2c)。

2.4 优势种类

羽摇蚊 (*C. plumosus*) 是高、低海拔梯田中的优势物种, 其在高海拔梯田的最高优势度出现在 6 月, 为 0.33, 在低海拔梯田的最高优势度出现在 5 月, 为 0.25 (表 3)。高海拔梯田大型底栖动物优势种类有 6 种, 低海拔梯田有 8 种。低海拔较高海拔出现的优势种是正颤蚓 (*Tubifex tubifex*)、参差仙女虫、苏氏尾鳃蚓 (*B. sowerbyi*)、摇蚊亚科一种 (*C. austini*)、伸足凯氏摇蚊 (*Kiefferulus tendipediformis*)、多齿斑蚊 (*Stictochironomus multannulatus*)。高海拔较低海拔出现的优势种是长跗摇蚊 (*Tanytarsus* sp.)、长足摇蚊亚科一种 (*Tanypodinae* sp.)。

高海拔梯田大型底栖动物优势种类摇蚊科 4 个月份平均密度为 306 ind/m^2 , 平均生物量为 0.0686 g/m^2 。低海拔梯田大型底栖动物优势种类摇蚊科 4 个月平均密度为 576 ind/m^2 , 平均生物量为 0.6165 g/m^2 。低海拔梯田大型底栖动物优势种类摇蚊科在密度和生物量方面均比高海拔梯田高。高海拔梯田大型底栖动物优势种类摇蚊科密度随着月份变化呈先升上后下降趋势, 生物量呈先下降后上升趋势 (图 3a)。低海拔梯田大型底栖动物优势种类摇蚊科密度和生物量均随着月份变化呈先降低后升高的趋势 (图 3b)。

2.5 密度和生物量

双因素方差分析 (two-way ANOVA) 表明, 高、低海拔大型底栖动物密度在月份、海拔均存在显著差异 ($P<0.05$), 月份、海拔间存在交互作用 ($P<0.05$)。生物量在月份间差异显著 ($P<0.05$), 但是在海拔间无显著差异 ($P>0.05$), 月份、海拔有交互作用 ($P<0.05$)。5 月和 8 月, 高、低海拔之间大型底栖动物群落密度在同一月份差异显著 ($P<0.05$), 6 月和 7 月高、低海拔之间密度在同一月份差异不显著 ($P>0.05$, 图 4a)。8 月, 高、低海拔之间大型底栖动物群落生物量差异显著 ($P<0.05$), 其余月份均不显著 ($P>0.05$, 图 4b)。

表 3 不同月份高、低海拔梯田内大型底栖动物优势物种及其优势度
Tab. 3 Dominant species of macrobenthos and their dominance in terraces at high and low altitude in different months

优势物种 dominant species	高海拔 high altitude				低海拔 low altitude			
	5 月	6 月	7 月	8 月	5 月	6 月	7 月	8 月
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>					0.02		0.08	
参差仙女虫 <i>Nais variabilis</i>					0.07			
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>						0.30		
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>				0.02		0.04	0.32	
菱跗摇蚊一种 <i>Clinotarypus</i> sp.	0.03							
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	0.07	0.33		0.05	0.25		0.02	0.03
雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes</i> sp.	0.23		0.07		0.07			
长跗摇蚊 <i>Tanytarsus</i> sp.	0.07	0.02						
长足摇蚊亚科一种 <i>Tanypodinae</i> sp.		0.03	0.06	0.22				
摇蚊亚科一种 <i>Chironomus austini</i>								0.20
伸足凯氏摇蚊 <i>Kiefferulus tendipediformis</i>								0.11
多齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus multannulatus</i>								0.03

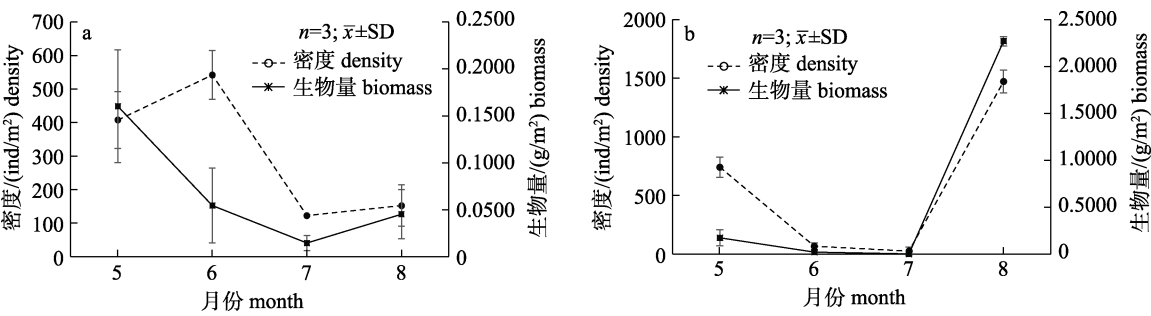


图 3 高海拔(a)和低海拔(b)梯田内摇蚊科优势种类的密度(ind/m²)和生物量(g/m²)周期动态
Fig. 3 Periodic dynamics of density (ind/m²) and biomass (g/m²) of dominant populations of Chironomidae in terraces at high altitude (a) and low altitude (b)

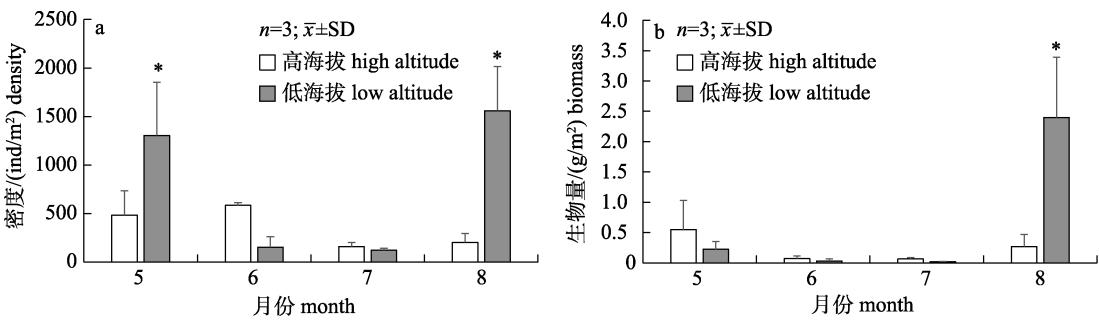


图 4 高、低海拔各月份大型底栖动物密度(a)和生物量(b)
*表示同一月份的高、低海拔之间差异显著(P<0.05).
Fig. 4 Density and biomass of macrobenthic in high and low altitude in different months
* indicates significant difference between altitudes in the same month (P<0.05).

3 讨论

3.1 高、低海拔大型底栖动物群落结构差异分析
大型底栖动物的群落结构很大程度上依赖于

水文环境和理化条件^[16], 其中水温是影响大型底栖动物群落结构的重要因素^[17]。已有研究表明, 水温是影响洞庭湖大型底栖动物群落结构的主要环境因子^[18], 渭河流域大型底栖动物多样性和水

温存在较密切关系^[17]。即使在海水环境中,水温也是影响一些大洋和港湾大型底栖动物群落结构的主要环境因子之一^[19-20],这些研究均体现了温度对大型底栖动物群落结构影响的重要性。不同海拔造成环境温度的差异,一般情况下,海拔每升高 100 m,气温会下降约 0.6 °C。本研究选取两处实验地点的海拔高度差超过 1200 m,实验期间低海拔梯田日平均水温为 26.34 °C,高海拔梯田日平均水温为 22.04 °C,高、低海拔日平均水温相差 4 °C 以上。在本研究中,高、低海拔梯田底栖动物群落组成之间存在显著差异($P<0.05$),并且低海拔梯田物种数多于高海拔,例如,在低海拔梯田中发现了福寿螺,而高海拔梯田中却没有发现。有研究表明,福寿螺(*P. canaliculata*)的最适水温为 20~35 °C^[21],恰好与低海拔梯田水温相对应。因此,海拔是影响哈尼梯田鲤综合种养系统中底栖动物群落出现结构差异的重要因素。

本研究显示,在 5 月放鱼前,低海拔梯田大型底栖动物密度大于高海拔梯田,但是生物量比高海拔梯田小。到了 6 月,高、低海拔梯田内生物量均出现下降现象。福瑞鲤属于底层鱼,喜欢在有腐殖质的泥层中寻找食物,幼鱼期摄食浮游生物,成鱼以红虫、水蚯蚓底栖动物和藻类等为主要食物,摄食量与水温密切相关,水温 20~25 °C,食欲最旺^[22]。福瑞鲤为适应新环境会不断取食,频繁的活动致使植株上部的昆虫很少停留,且受体型小的限制,无法取食植株上部停留的昆虫,只能取食水体中的底栖动物,由于福瑞鲤增大对大型底栖动物的摄食压力,导致梯田内大型底栖动物的生物量出现下降现象。到了 7 月,随着鱼体型的增大,其取食量和取食能力也大幅度提升,在此阶段,稻田底栖动物的数量和种类会随着鱼类的捕食大幅度地减少^[23],因此大型底栖动物的生物量仍然保持较低水平。水稻喜高温、多湿、短日照,抽穗适温 25~35 °C,低温会使枝梗和颖花分化延长^[24]。低海拔稻田中水稻 7 月上旬开始抽穗开花,而高海拔由于温度较低,水稻抽穗较低海拔晚,到 8 月上旬才开始抽穗开花。但是,7 月份低海拔稻田中底栖动物生物量仍处于较低水平,原因是低海拔梯田内水温较高,梯田内的鲤个体

大,食欲强,在水稻抽穗开花前期鲤仍然压制大型底栖动物。到了 8 月,高、低海拔梯田大型底栖动物的生物量出现上升现象,尤其低海拔梯田上升明显。8 月低海拔处水稻已开花结穗,高海拔处水稻正处于抽穗期,水稻花脱落入田中,增加了稻渔综合种养系统中鲤科鱼类的食物来源,福瑞鲤能够摄食水稻花^[25],进而减轻了对大型底栖动物的摄食压力,因此大型底栖动物的生物量出现上升现象。在稻渔综合种养系统中大型底栖动物高峰期出现在放鱼前期和水稻成熟期,放鱼后,由于鲤的摄食,大型底栖动物生物量出现下降趋势。根据高、低海拔哈尼梯田大型底栖动物群落变化情况,在底栖生物的生物量较低的月份(高海拔 6 月、7 月;低海拔 6 月、7 月)可以人为适量投喂饲料,并且在低海拔梯田适当清除大个体福寿螺。

3.2 大型底栖动物中的害虫对高、低海拔梯田生产的潜在影响

稻田中的害虫对水稻产量的影响较大,水稻常见害虫主要分为食叶害虫类、钻蛀害虫类、吸汁害虫类和食根害虫类 4 类^[26]。已有研究表明,大型底栖动物中的部分摇蚊科种类和福寿螺会对水稻的生长产生有害影响。摇蚊亚科(Chironominae)的摇蚊属(*Chironomus*)和长跗摇蚊属(*Tanytarsus*)中的一些种类会对水稻产生危害^[27]。其幼虫会取食水稻根部和水稻幼苗,甚至有些会损伤水稻种子的幼胚;还可以在水稻叶面内生活,啃食叶肉^[28],在水稻叶片上钻洞并最终啃食整片稻叶,兼具食根、钻蛀和食叶危害。稻田是摇蚊科种类栖息的重要场所之一,摇蚊科种类生活史较长,属于完全变态发育,耐受性很强,其幼虫是稻田底栖动物的优势种类^[29],这一点在本研究中得到了证实,在低海拔哈尼梯田稻渔综合种养系统中,摇蚊科是主要优势种类,主要以幼虫形态出现,并且在大型底栖动物总量中占有较高的比例,生物量较大,其对水稻产生的危害不可忽视。摇蚊亚科一种(*C. austini*)是低海拔梯田内的优势种类,低海拔梯田优势种类摇蚊科的密度和生物量均高于高海拔梯田。在高、低海拔梯田内放鱼后,6 月和 7 月摇蚊科种类生物量出现下降现象。因为摇蚊幼虫是大多数肉食和杂食性鱼类的优质饵料^[30],是福

瑞鲤喜食的底栖动物之一。这说明福瑞鲤摄食摇蚊幼虫减少了稻渔综合种养系统中害虫的生物量,降低了水稻病虫害的发生。而到8月,摇蚊科种类生物量又出现上升现象,这与此月份福瑞鲤的食物组成中稻花占比上升导致其对大型底栖动物摄食压力下降有关,因此,在8月水稻成熟前期应加强防治水稻病虫害。此外,本研究在低海拔梯田内还发现福寿螺,且生物量较大,福寿螺会啃食水稻幼苗整株、主蘖及有效分蘖,使水稻有效分蘖和有效穗减少,属于食叶害虫,会直接降低水稻产量^[31]。

3.3 大型底栖动物在哈尼梯田稻渔综合种养系统中的生态作用

大型底栖动物主要是通过其摄食、掘穴和建管等扰动活动直接或间接地影响着所在的生态系统^[32],其作为稻渔综合种养系统中不可或缺的部分,具有重要的生态作用。第一,大型底栖动物可以作为鱼类的天然饵料^[22],不同海拔哈尼梯田稻鲤综合种养系统中,颤蚓科和摇蚊科的种类能够为低海拔梯田中的鲤提供饵料,摇蚊科种类能够为高海拔梯田中的鲤提供饵料。第二,大型底栖动物中的一些种类可以作为监测水体环境和污染状况的指示生物,例如,霍甫水丝蚓和正颤蚓在生活污水口、食品加工厂或造纸厂排污口附近趋向于绝对优势,是很好的有机污染(富营养)指示生物^[33]。Goodnight^[34]提出以颤蚓类数量占全部底栖动物数量的百分比评价水质状况,颤蚓类数量越少,表明所处环境水质越好。研究发现低海拔梯田的优势物种有颤蚓类的正颤蚓(*T. tubifex*)、霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*),而高海拔梯田中,未发现正颤蚓,虽然发现霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*),但是其并非优势物种。这说明高海拔梯田水体的水质情况比低海拔处要好。此外,摇蚊科种类与环境条件存在密切关系,有些摇蚊种类也可以作为水质监测生物。国外多年前就已经利用摇蚊幼虫口器或触角的形态变化以及摇蚊幼虫的分布格局作为监测湖泊或河流水质、湖泊营养状态和污染程度的指标^[35]。摇蚊科的一些种类对水质变化极为敏感,例如,在清洁水体或轻污染水体中长足摇蚊亚科出现的数量多^[35]。本研究只在高海拔

梯田中发现长足摇蚊亚科的种类,这也进一步说明高海拔梯田的水质要优于低海拔梯田。本研究对水质监测的结果也证实了这一点。这主要是因为低海拔区域村镇聚集、人口密集,生活污水可以随溪流进入梯田。第三,大型底栖动物可以促进生态系统物质循环,能通过生物扰动促进水体底泥中氮、磷的释放^[36],促进水稻生长。哈尼梯田低海拔处发现霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*),高海拔处发现霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*)、巨毛水丝蚓(*L. grandisetosus*),水丝蚓能够促进稻田土壤硫化细菌、硝化细菌、纤维素分解菌、氨化细菌和固氮菌的增殖,抑制反硫化细菌和反硝化细菌的生长和活性,有利于增加土壤硫、氮、磷等生源要素的有效性,提高稻田土壤养分的利用效率^[37],从进而提高水稻产量,增加经济效益。

参考文献:

- [1] Yao M, Cui B S. The vertical characteristics of ecosystem of Hani's terrace paddy field in Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2115-2124. [姚敏, 崔保山. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2115-2124.]
- [2] Wu L P. A study of Hani terraces tourist landscape management on the basis of semiotics[D]. Kunming: Yunnan University, 2018. [伍乐平. 基于符号学的哈尼梯田旅游景观管理研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.]
- [3] Yu K, Song Q H, Zhao Y F. The status quo and industrialization of rice-aquaculture integrated cultivation in Jiangsu[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(23): 161-164. [余开, 宋迁红, 赵永锋. 江苏省稻渔综合种养现状与产业化发展思考[J]. 中国农学通报, 2020, 36(23): 161-164.]
- [4] Report on the development of Rice-fishing comprehensive farming Industry in China(2019)[J]. China Fisheries, 2020(1): 16-22. [中国稻渔综合种养产业发展报告(2019)[J]. 中国水产, 2020(1): 16-22.]
- [5] Dai J C, Ni J R. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 2107-2111. [戴纪翠, 倪晋仁. 底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2107-2111.]
- [6] Helson J E, Williams D D. Development of a macroinvertebrate multimetric index for the assessment of low-land streams in the neotropics[J]. Ecological Indicators, 2013, 29: 167-178.
- [7] Couceiro S R M, Hamada N, Forsberg B R, et al. A macroinvertebrate multimetric index to evaluate the biological condi-

- tion of streams in the Central Amazon region of Brazil[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 118-125.
- [8] Huang Q, Gao J F, Cai Y J, et al. Development and application of benthic macroinvertebrate-based multimetric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 649-659.
- [9] Wang B X. Water quality bioassessment using benthic macroinvertebrates[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. [王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.]
- [10] Shannon C E, Weaver W J. *Mathematical Theory of Communication*[M]. Illinois: University of Illinois Press, 1949.
- [11] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [12] Margalef R. *Perspective in Ecological Theory*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [13] An C G, Zhao Y L, Lin L, et al. The biodiversity of macrobenthos of intertidal zone on Chongming Island in summer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 577-586. [安传光, 赵云龙, 林凌, 等. 崇明岛潮间带夏季大型底栖动物多样性[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 577-586.]
- [14] Shou L, Zeng J N, Liao Y B, et al. Seasonal distribution of macrozoobenthos and its relations to environmental factors in Oujiang River estuary sea area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1958-1964. [寿鹿, 曾江宁, 廖一波, 等. 瓯江口海域大型底栖动物分布及其与环境的关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1958-1964.]
- [15] Yan Y J, Li X Y, Liang Y L. A comparative study on community structure of macrozoobenthos between macrophytic and algal lakes[J]. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(2): 176-182. [闫云君, 李晓宇, 梁彦龄. 草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 176-182.]
- [16] Fu F F, Li C H, Xu S N. Analysis of the characteristics of the macrobenthic community of Jiaozhou Bay in winter[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(1): 159-168. [符芳菲, 李纯厚, 徐姗姗. 胶州湾冬季大型底栖动物群落结构及其与环境因子的相关性[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(1): 159-168.]
- [17] Zhang T F, Ren C L, Wang L, et al. Macrobenthos abundance and its influencing factors in the Weihe River[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2015, 51(2): 197-201. [张台凡, 任超亮, 王莉, 等. 渭河流域大型底栖动物多度及其影响因素研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(2): 197-201.]
- [18] Wang C M, Zhang Y, Shi H H, et al. Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality in Lake Dongting, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(2): 395-404. [王丑明, 张屹, 石慧华, 等. 洞庭湖大型底栖动物群落结构和水质评价[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(2): 395-404.]
- [19] Li B Q, Li X Z, Yu H Y, et al. Macrobenthic Mollusca fauna and its relations to environmental factors in Jiaozhou bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(3): 193-198. [李宝泉, 李新正, 于海燕, 等. 胶州湾底栖软体动物与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(3): 193-198.]
- [20] Jayaraj K A, Jayalakshmi K V, Saraladevi K. Influence of environmental properties on macrobenthos in the northwest Indian shelf[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 127(1-3): 459-475.
- [21] Fu X Y, Wang H Q. Effects of temperature on growth and development of *Ampullaria gigas*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1999, 23(1): 21-26. [傅先源, 王洪全. 温度对福寿螺生长发育的影响[J]. *水产学报*, 1999, 23(1): 21-26.]
- [22] Li X X, Xia A J, Zhu T, et al. Breeding method of a new hybrid of FFRC strain common carp (*Cyprinus carpio* L.) and *Cyprinus carpio* var. *jian*: CN109526816A[P]. 2019-03-29. [李潇轩, 夏爱军, 朱天, 等. 一种福瑞鲤和锦鲤杂交新品种的选育方法: CN109526816A[P]. 2019-03-29.]
- [23] Wang B R, Fu Z Q. Effects of ecological cultivation on the biodiversity of rice field[J]. *Crop Research*, 2019, 33(5): 356-361. [王勃然, 傅志强. 稻田生态种养对系统生物多样性的影响[J]. *作物研究*, 2019, 33(5): 356-361.]
- [24] Wu Y B, Chen D N, Zhang M D, et al. Study on rice chilling injury index in Yunnan Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(2): 95-99. [吴永斌, 陈丹妮, 张明达, 等. 云南地区水稻低温冷害指标研究[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(2): 95-99.]
- [25] Yang Y. Study on ecological characteristic and technique for safe, good quality and high benefit of rice-fish culture[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004. [杨勇. 稻渔共作生态特征与安全优质高效生产技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2004.]
- [26] Huang J Y. Eco-agriculture and the study on eco-agriculture model[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5): 376-379. [黄进勇. 生态农业及其模式研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(5): 376-379.]
- [27] Armitage P D, Cranston P S, Pinder L C V. *The Chironomidae: The Biology and Ecology of Non-biting Midges*[M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [28] Ferrarese U. Chironomids of Italian rice fields[J]. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 1992, 26(2-4): 341-346.
- [29] Li Z Y, Yang H, Fu Q, et al. Research progress on non-biting

- midges in rice field[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, 38(6): 150-154. [李志宇, 杨洪, 傅强, 等. 稻田摇蚊的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(6): 150-154.]
- [30] Zhong Y Q. Comprehensive prevention and control technology of paddy *Pomacea canaliculata* in rice fields[J]. China Agricultural Information, 2016(1): 135-136. [钟永清. 水稻田有害生物福寿螺综合防治技术[J]. 中国农业信息, 2016(1): 135-136.]
- [31] Chen X, He C, Gu X M. Study on the feeding effect of *Chironomus* larvae extract and pond snail extract on common carp[J]. China Fisheries, 2013(6): 53-55. [陈翔, 何川, 顾宪明. 摇蚊幼虫提取液和田螺提取液对鲤鱼的诱食效果研究[J]. 中国水产, 2013(6): 53-55.]
- [32] Ding J K, Xue S Y, Li J Q, et al. Health assessment of large-scale aquaculture on benthic habitats in Sanggou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1393-1401. [丁敬坤, 薛素燕, 李加琦, 等. 基于大型底栖动物的桑沟湾不同养殖区底栖生境健康评价[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1393-1401.]
- [33] Brinkhurst R O. The Benthos of Lakes[M]. London: Palgrave, 1974.
- [34] Goodnight C J, Whitley L S. Oligochaetes as indicators of pollution[R]. Proceedings of 15th Annual Water Conference. Indiana, 1960, 106: 139-142.
- [35] Wang J C, Fang Z G, Ju F H, et al. Distribution of Chironomidae larvae and its relation to water quality[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(4): 27-37. [王俊才, 方志刚, 鞠复华, 等. 摇蚊幼虫分布及其与水质的关系[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 27-37.]
- [36] Ma J, Fu R S. Progress of ecology research on macrobenthos[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010, 42(2): 78-81. [马骏, 付荣恕. 大型底栖动物生态学研究进展[J]. 山东农业科学, 2010, 42(2): 78-81.]
- [37] Sun G, Fang Y, Bi Y H. Effects of *Limnodrilus* on soil microorganisms in paddy field[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(22): 53-56. [孙刚, 房岩, 毕雨涵. 水丝蚓对稻田土壤微生物的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(22): 53-56.]

Characteristics of the macrobenthic community structure in integrated rice-carp farming terraces at different altitudes

XU Yue^{1,2}, FANG Jinghui^{2,4}, XU Gangchun³, JIANG Zengjie^{2,4}, NIE Zhijuan³, LIANG Bo^{1,2}, LIN Fan^{2,4}

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
3. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214128, China;
4. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: The spectacular scenery of Hani terraces is an intangible world cultural heritage, but in recent years, the deterioration of these terraces, owing to the loss of young adult carp, is becoming increasingly severe, and they require urgent protection. In the present study, we investigated the ecological characteristics of the integrated rice-carp farming system in Hani terraced fields, which will provide a reference for optimizing the technical processes of integrated rice-carp farming systems in Hani terraced fields at different altitudes. From May to August 2019, a survey of the macrobenthos in integrated rice-carp farming terraces at different altitudes (570 m and 1840 m) was carried out at the Hani terraces in Honghe County, Yunnan Province. We investigated the differences in community composition, density, biomass, and diversity of macrobenthos of these Hani terraces. The Jargensen index and Jaccard similarity index were used to compare the similarity of macrobenthos community structures from high and low elevations, and the Shannon-Wiener, Pielou evenness, and Margalef richness indexes were used to evaluate biodiversity. Two-way analysis of variance (two-way ANOVA) was used to identify significant differences in the Shannon-Wiener, Pielou evenness, and Margalef richness indexes, density, and biomass of macrobenthos communities between high and low altitudes. The results showed that. (1) A total of 25 species of macrobenthos were found in low altitude terraces, which belonged to 3 phyla and 3 classes and included 9 species of Oligochaeta, 16 species of Insecta, and 1 species of Gastropoda. A total of 24 macrobenthic species were found in high altitude terraces, which belonged to 2 phyla and 2 classes and included 3 species of Oligochaeta and 21 species of Insecta. Oligochaeta and Insecta were the main macrobenthic groups in high and low altitude terraces, and the species compositions was significantly ($P<0.05$) different between the two altitudes. The rice pests *Chironomus* and *Tanytarsus* were found in terraces at both high and low altitudes. In addition, the rice pest *Pomacea canaliculata* was found at low altitudes. (2) The Jorgensen index and Jaccard similarity index values indicated differences in the macrobenthic community structure at the two altitudes during the 4 months that the study was conducted. (3) In June and July, the Shannon-Wiener diversity, Pielou evenness, and Margalef richness indexes between the high and low altitudes were significantly different in the same month ($P<0.05$), while the differences in the other months were not significant ($P>0.05$). (4) The two-way ANOVA showed that month and altitudes significantly ($P<0.05$) affected the density of macrobenthos at high and low altitudes and that month significantly ($P<0.05$) affected the biomass, but there was no significant difference between altitudes ($P<0.05$). There also was an interaction between density and biomass in month and altitude ($P<0.05$). The present study showed that altitude and month were the key factors affecting the macrobenthic community structure of the Hani terraced integrated rice-carp farming system at different altitudes. Concurrently, the feeding pressure of carp was also an important factor of differences in the macrobenthic community structure, which reduced the pest biomass in the Hani terraced integrated rice-carp farming system.

Key words: carp; integrated rice-fish farming; macrobenthos; community structure; Hani terraces; altitude

Corresponding author: FANG Jinghui. E-mail: hui861@163.com